

ЭПТ 2015



ACED 2015

УДК 519.876.5, 621.3.078

## **5.10. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ СИМУЛЯТОРЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

## **HARDWARE AND SOFTWARE SIMULATORS OF ELECTROTECHNICAL COMPLEXES**

**Зюзов Анатолий Михайлович**, д.т.н., доцент, профессор каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

**Мудров Михаил Валентинович**, аспирант каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: m.v.mudrov@urfu.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

**Нестеров Константин Евгеньевич**, к.т.н., доцент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: k.e.nesterov@urfu.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

**Поляков Максим Владимирович**, соискатель, каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. Тел.: +7 (343) 375-46-46

**Anatoliy M. Zyuzev**, Doctor Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru.

Ph.: +7 (343) 375-46-46

**Mikhail V. Mudrov**, Graduate Student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: m.v.mudrov@urfu.ru.

Ph.: +7 (343) 375-46-46

**Konstantin E. Nesterov**, Candidate of Science, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: k.e.nesterov@urfu.ru. Ph.: +7 (343) 375-46-46

**Maksim V. Polyakov**, Graduate Student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. Ph.: +7 (343) 375-46-46

**Аннотация:** Рассматриваются структуры симуляторов электромеханических устройств, приводятся технология создания и особенности построения программно-аппаратных симуляторов различного назначения. Показано, что современные средства обработки информации позволяют выполнять решение уравнений математических моделей сложных электротехнических комплексов и систем в «реальном времени», что обеспечивает возможность построения программно-аппаратных симуляторов, которые могут эффективно использоваться для проектных и пуско-наладочных работ, а также с целью обучения студентов и производственного персонала предприятий.

**Abstract:** Electro-mechanical devices simulator structures are under consideration, technology of creation and design features of software-hardware simulators for various purposes are presented. It is shown that modern means of information processing allow you to solution of mathematical models of complex electrical systems and «real time» systems, enabling the construction of software and hardware simulators that can be effectively used for the design and starting-up and adjustment work, and to educate students and the production staff of enterprises.

**Ключевые слова:** программно-аппаратный симулятор; математическое моделирование; электропривод; программируемая логическая интегральная схема, реальное время.

**Key words:** hardware-software simulator; mathematical modeling; electric drive; field-programmable gate array, real time.

## ВВЕДЕНИЕ

Симуляция работы систем электроприводов и электротехнических комплексов в реальном времени является актуальной задачей, так как проведение экспериментальных исследований и пуско-наладочных работ в области электротехники и электроэнергетики часто связано с определенными сложностями, такими как ограничения технологического порядка и высокий риск повреждения оборудования. Новое поколение программно-аппаратных средств позволяет решать эту задачу с высокой степенью достоверности.

Симуляторы электрооборудования могут использоваться для моделирования в реальном времени динамических характеристик электродвигателя [1-3], преобразователя [4], систем «преобразователь-двигатель» [5] или «преобразователь-двигатель-механизм» [6].

Например, для наладки системы управления электропривода может использоваться симулятор силовой части электропривода, моделирующий работу преобразователя, электродвигателя и нагрузки, который принимает реальные сигналы управления ключами преобразователя и выдает сигналы обратных связей в систему управления. Цикл работы симулятора состоит из чтения входных сигналов, их обработки и выдачи выходных сигналов. Продолжительность этого цикла определяет область возможного применения симулятора. Для моделирования работы тиристорных преобразователей может быть достаточно цикла длительностью в одну и более миллисекунду. Моделирование работы транзисторных преобразователей с ШИМ требует длительности цикла порядка микросекунды.

Аппаратно-программный симулятор может быть выполнен на базе персонального компьютера, работающего под управлением операционной системы реального времени [7].

Быстрый процессор способен реализовать сложные алгоритмы обработки входных сигналов с применением переменных с плавающей запятой. Это гарантирует высокую точность расчета модели оборудования и минимизацию ошибок округления, что особенно важно при наличии в модели объекта интеграторов. В таком симуляторе частота опроса входных сигналов может достигать сотен килогерц, однако частота цикла чтение-обработка-выдача обычно не превышает нескольких сотен герц, при этом входные сигналы считываются блоками, содержащими сотни или тысячи значений. Относительно низкая частота выдачи выходных сигналов обусловлена структурой персонального компьютера и ограничивает область применения подобных симуляторов моделированием систем, содержащих тиристорный преобразователь.

Имитация работы транзисторного преобразователя требует большего быстродействия, обеспечить которое могут системы на основе цифрового сигнального процессора (DSP) или программируемой

логической интегральной схемы (ПЛИС). Авторы не располагают информацией об использовании DSP для построения подобных симуляторов. Вариант реализации симуляторов на основе ПЛИС получил широкое распространение благодаря её высокому быстродействию и наличию удобных средств программирования. На рис. 1 показана структура такого симулятора, созданная авторами на основе оборудования National Instruments (NI).

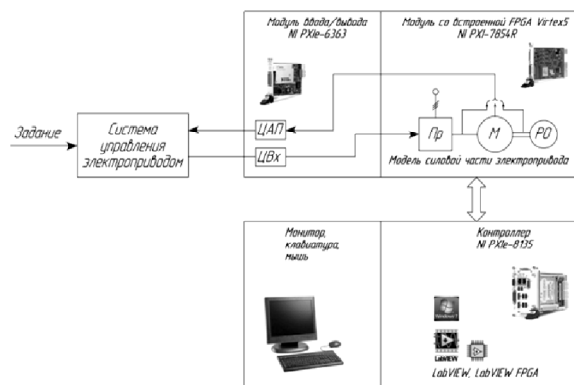


Рис. 1. Структура симулятора на базе ПЛИС

На рис.1 обозначено: ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, ЦВх – цифровые входы, Пр – преобразователь, М – двигатель, РО – рабочий орган.

## ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ СИМУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Разработка программного кода симулятора может выполняться следующим образом. Модель имитируемой системы предварительно создается и тестируется в среде MatLab / Simulink. После отладки она компилируется встроенными средствами MatLab в HDL-код и при помощи специализированного ПО загружается на ПЛИС. Этот алгоритм позволяет получить результат за относительно короткое время, но требует серьезных финансовых затрат на приобретение пакета MatLab и необходимых расширений. Другая технология разработки ПО симулятора заключается в программировании модели в среде LabVIEW, её отладке на персональном компьютере и последующем ручном преобразовании-оптимизации для использования на ПЛИС [6]. В этом случае все этапы работы, включая загрузку кода на ПЛИС, выполняются при помощи средств LabVIEW, а созданный таким образом симулятор обладает высоким быстродействием.

Для создания симуляторов систем электроприводов [8-12] авторы использовали схему разработки программного кода, основанную на построении модели в среде MatLab / Simulink с последующим ручным переносом её в среду LabVIEW. Данная технология позволяет относительно быстро получить эталонную модель (в среде MatLab / Simulink) и высокоэффективный код для ПЛИС (в среде LabVIEW). Проверка перенесенной в LabVIEW модели заключается в сравнении результатов её

работы с результатами этой же модели, созданной в MatLab / Simulink. Для получения кода, исполняемого ПЛИС с максимальным быстродействием, используются специальные инструкции из раздела HighThroughputMath. Кроме того, операции деления по возможности заменяются операциями умножения, так как скорость выполнения последних значительно выше.

Используя описанную методику, созданы математические модели, работающие в реальном времени, такие как модель трехфазного тиристорного преобразователя напряжения [8], модель вентильного электродвигателя [9], модель трехфазного транзисторного инвертора напряжения [10], модель асинхронного электродвигателя в двухфазной системе координат [11], модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением [12]. Ключевая особенность ПЛИС заключается в том, что она обладает возможностью одновременного выполнения большого числа операций. Поэтому для получения высокой скорости расчета следует создать код, оптимизированный для параллельного выполнения. Следует избегать использования последовательного построения алгоритма расчета моделей, т.к. он приводит к неудовлетворительным по скорости расчета результатам. Оптимизированный для параллельного выполнения код может быть получен, если исходные уравнения модели записаны в нормальной форме Коши. Тогда по каждому уравнению создается код, обеспечивающий расчёт соответствующей переменной на основе значений других переменных, взятых с предыдущего такта расчета.

При использовании достаточно малого (по сравнению с постоянными времени объекта моделирования) шага расчета такая концепция даёт вполне удовлетворительный результат. Например, при моделировании асинхронного электродвигателя с шагом расчета 1 мкс различие результатов последовательного и параллельного алгоритмов не превысило 1% (сравнение выполнено по электромагнитному моменту двигателя). Среднеквадратичное отклонение составило около 0,1%.

Недостатком ПЛИС можно считать отсутствие поддержки математических команд над переменными с плавающей запятой, доступны только типы с фиксированной точкой и целочисленные. Целочисленная математика усложняет расчет моделей, так как требует использования специальной системы относительных единиц. Более удобным по сравнению с использованием целочисленных переменных выглядит применение переменных с фиксированной точкой. Для переменных этого типа можно задать количество разрядов для хранения целой и дробной частей. Выбор разрядности целой и дробной частей должен быть сделан с учётом диапазона возможных изменений значений переменных. Увеличение разрядности переменных приводит к снижению скорости расчёта и

увеличению объёма программы. Применение “длинных” переменных может привести к тому, что модель будет рассчитываться недопустимо медленно или не поместится на используемую ПЛИС. Уменьшение разрядности переменных вызывает понижение точности моделирования из-за накопления ошибок округления. Особенно это проявляется в моделях с большим числом дифференциальных уравнений.

На основе модели асинхронного электродвигателя авторами проведено исследование погрешности расчёта от разрядности используемых переменных. В результате установлено, что при расчёте использованной модели асинхронного электродвигателя с шагом  $10^{-6}$  с достаточно применить переменные разрядностью 36 бит, из которых под дробную часть отведено 32 бит. При этом среднеквадратичная ошибка расчёта электромагнитного момента двигателя не превышает 0,01% [13].

### АПРОБАЦИЯ СИМУЛЯТОРА

Симулятор силовой части электропривода апробирован на схемах тиристорного преобразователя напряжения – ТПН (устройства плавного пуска) и ПЧ с ШИМ. В первом случае симулятор был построен на базе платы NI Single-Board RIO 9632, содержащей микроконтроллер и ПЛИС Xilinx Spartan-3, во втором случае – по структуре на рис. 1. Симулятор системы ТПН-АД принимает на входы ПЛИС управляющие импульсы тиристоров от контроллера системы импульсно-фазового управления (СИФУ) и моделирует работу силовой части электропривода (преобразователя, двигателя и механизма). Для синхронизации модели электропривода с сетевым напряжением на вход ПЛИС из системы управления подается сигнал синхронизации СИФУ. На рис. 3 показаны осциллограммы напряжения и тока двигателя в системе ТПН-АД при угле управления преобразователем 100 эл. град.

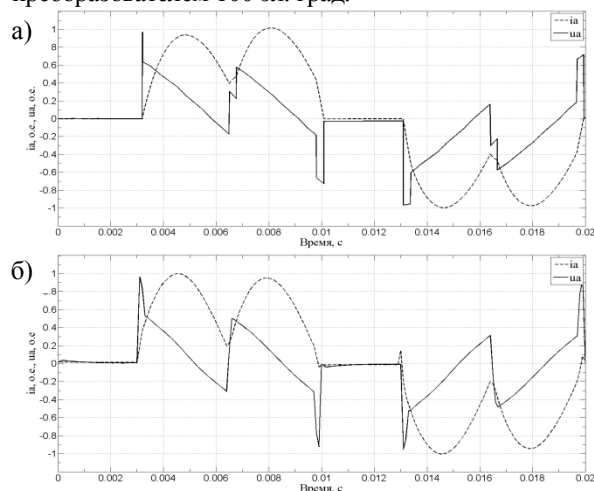


Рис. 3. Осциллограммы напряжения и тока двигателя в симуляторе системы ТПН-АД (а) и в реальной системе ТПН-АД (б).

Симулятор системы «ПЧ-АД» опробован по аналогичной схеме: сигналы управления шестью ключами инвертора от контроллера системы управления электропривода поданы на входы ПЛИС, которая выполняет расчет модели преобразователя, двигателя и механизма.

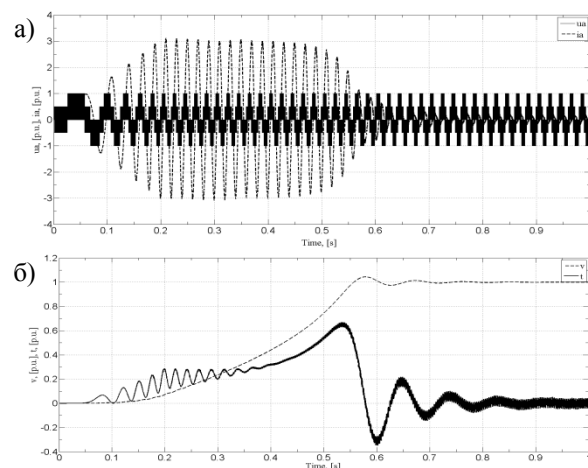


Рис. 4. Осциллограммы напряжения и тока (а), момента и скорости (б) двигателя в симуляторе системы ПЧ-АД при пуске  $U/F=\text{Const}$ .

Для обеих систем шаг расчета математических моделей не превышал 1 мкс, а частота опроса аналоговых и дискретных входов ПЛИС – 1 МГц. Полученные результаты подтверждают возможность решения системы уравнений, например, асинхронного электродвигателя с преобразователем частоты с ШИМ «в реальном времени» на периоде 1 мкс, чего вполне достаточно для выявления реакции электропривода на реальные управляющие воздействия.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проделанная работа позволяет сделать вывод о возможности создания симуляторов силовой части электроприводов реального времени, предназначенных для наладки, тестирования и исследования систем управления электроприводами. Следующим этапом работы авторы видят создание HIL-симуляторов, управляющих преобразователем, выполняющим роль нагрузки для тестируемого преобразователя. Задачей симулятора в этом случае будет являться не только моделирование работы электропривода, но и управление нагрузочным преобразователем.

### ЛИТЕРАТУРА

1. FPGA-Based Real-Time Simulation of Finite-Element Analysis Permanent Magnet Synchronous Machine Drives / Christian Dufour, Jean Bélanger, Simon Abourida, Vincent Lapointe / DOI 10.1109/EPE.2007.4417435.

2. FPGA based Hardware-in-the-Loop (HIL) simulation of induction machine model / Duman, E., Can, H., Akin, E. / DOI 10.1109/EPEPEMC.2014.6980564.
3. FPGA-based Real-Time Simulation of a Dual Three-Phase Induction Machine / Raul Gregor, Guido Valenzano, José Rodriguez-Pineiro, Jorge Rodas.
4. An FPGA-based real-time simulator for HIL testing of modular multilevel converter controller / Wei Li, Gregoire, L.-A., Souvanlasy, S., Belanger, J. / DOI 10.1109/ECCE.2014.6953678.
5. Ziuzev, A.M., Nesterov K.E., Mudrov M.V. The software-hardware simulator of the electric drive. Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe), 2014 16th European Conference on DOI: 10.1109/EPE.2014.6911018.
6. Зюзов А.М., Нестеров К.Е., Мудров М.В. Программно-аппаратный комплекс для моделирования электроприводов в реальном времени. Электротехника. 2014. №9. С. 56-62.
7. Ahmadeev E., Beliaev D., Ilijin E., Weinger A. The Virtual Test Bench of Medium Voltage Controlled AC Drives. 15th, IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling. APPLIED SIMULATION AND MODELLING; 340-345.
8. Зюзов А.М., Нестеров К.Е., Мудров М.В. ПЛИС модель-симулятор трехфазного тиристорного преобразователя напряжения // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014660944. М.: РОСПАТЕНТ, 20.10.2014. Уральский федеральный университет (RU), заявка № 2014618877 от 03.09.2014.
9. Зюзов А.М., Нестеров К.Е., Мудров М.В. ПЛИС модель-симулятор вентильного электродвигателя // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014660942. М.: РОСПАТЕНТ, 20.10.2014. Уральский федеральный университет (RU), заявка № 2014618880 от 03.09.2014.
10. Зюзов А.М., Нестеров К.Е., Мудров М.В., Костылев А.В. ПЛИС модель-симулятор трехфазного транзисторного инвертора напряжения // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661060. М.: РОСПАТЕНТ, 20.10.2014. Уральский федеральный университет (RU), заявка № 2014618875 от 03.09.2014.
11. Зюзов А.М., Нестеров К.Е., Мудров М.В., Костылев А.В. ПЛИС модель-симулятор асинхронного электродвигателя в двухфазной системе координат // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №201461267. М.: РОСПАТЕНТ, 28.10.2014. Уральский федеральный университет (RU), заявка № 2014618828 от 02.09.2014.
12. Зюзов А.М., Нестеров К.Е., Мудров М.В. ПЛИС модель-симулятор двигателя постоянного тока с независимым возбуждением // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014660946. М.: РОСПАТЕНТ, 20.10.2014. Уральский федеральный университет (RU), заявка № 2014618878 от 03.09.2014.
13. Костыгов А.М., Зюзов А.М., Солодкий Е.М., Кухарчук А.В., Мудров М.В., Нестеров К.Е. Состояние и перспективы использования аппаратно-программных симуляторов электротехнических комплексов. Электротехника. 2015. №6. С. 8-12.